

EVALUACIÓN DE SINERGIAS ENTRE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PARA EL PLANEAMIENTO Método de la Teoría de Grafos

Evaluating the synergies of ecosystemic services
Applying Graph Theory

José Ramón Pareja Monturiol

Investigador predoctoral en el Instituto de Ciencias Matemáticas del CSIC, miembro del grupo Matemáticas e Información Cuántica de la UCM (mathqi)

joserapa@icmat.es

Lucas Martí Guitera

Graduado en Fundamentos de la Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid

Lucas.marti.guitera@alumnos.upm.es

RESUMEN

El actual contexto de crisis climática requiere de una evolución en el planeamiento que permita dirimir la protección del suelo frente a su desarrollo en función de su capacidad para proveernos de servicios ecosistémicos. En este sentido, es primordial poder valorar no sólo dichos servicios, sino también las interacciones que ejercen entre ellos. El objetivo de la presente investigación es definir un método claro y replicable de análisis de dichas interacciones, consiguiendo generar cartografías a partir del mismo, usando como ejemplo el caso de la Comunidad de Madrid. Para ello, se ha utilizado la Teoría de Grafos como método para obtener la combinación de servicios más ventajosa, arrojando no sólo una valoración más detallada de los servicios que un ecosistema pueda ofrecer, sino una propuesta de régimen de usos razonada por el propio método.

Palabras clave: Cambio climático, resiliencia, Comunidad de Madrid, protección del suelo.

Bloque temático: B2.1_Cambio climático y crisis de recursos

ABSTRACT

The current context of climatic crisis requires modification of planning policies oriented to decide whether an area should be protected from urban development regarding its capacity to provide us with ecosystemic services. In this sense, it is of paramount importance to be able to evaluate not only those services, but also the interactions between them. The aim of the present investigation is to define a clear and replicable method to analyse the said interactions, obtaining a map with those data, using as an example the case of the Community of Madrid. To achieve this, Graph Theory was applied as the preferred method to obtain the best combination of services for a given ecosystem. Not only a more detailed evaluation was achieved, but also a relation of the best services to be combined, proving as a possible list of allowed uses in the area coming directly from the Graph Theory Analysis.

Keywords: ecosystemic services, Graph Theory, Community of Madrid, land protection

Topic: B2.1_Climate change and resource crisis

Introducción

En el actual contexto de crisis climática, la necesidad imperiosa de escoger con máximo cuidado el destino del suelo convierte al planeamiento en un instrumento clave de la gestión y mitigación de los efectos de la crisis. En ese sentido y para el contexto español, donde se ha de justificar la falta de aptitud de los suelos para ser urbanizados, algunas investigaciones han planteado de un tiempo a esta parte la posibilidad de justificar la protección del suelo a través del concepto de los servicios ecosistémicos (Fernández et al., 2020; Córdoba, 2021). Según el Millenium Ecosystem Assessment (2004), los servicios de un ecosistema consisten en los beneficios que podemos obtener de ellos. Esto presupone que se puede atribuir a cada ecosistema natural o antropizado una cierta potencialidad de prestar servicio a los seres humanos, ya sea en cuanto a abastecimiento, a regulación de los ciclos naturales en que estamos indefectiblemente inmersos, o en cuanto al conocimiento y solaz que pueden brindarnos. De esta manera, se plantea la posible protección frente a la urbanización de aquellos suelos con ecosistemas capaces de brindarnos múltiples beneficios, aduciendo un valor cuantificable para el ecosistema más allá que su valor intrínseco como espacio natural. En el caso de estudio específico de la Comunidad de Madrid, además, su enorme impacto sobre el resto de las regiones de España implica que, de aprovechar mejor sus ecosistemas, reduciría su impacto a nivel nacional, con las ventajas que eso conlleva. Hay que mencionar que, pese a haber escogido Madrid como la región de ejemplo, el método propuesto en esta investigación es aplicable a cualquier región que cuente con los datos de partida de ésta.

1. Estado de la cuestión y objetivos

Tomando como punto de partida la cuestión de los servicios ecosistémicos, y basándose en las cartografías del Corine Land Cover y el SIOSE, a nivel europeo y español, respectivamente, diversas investigaciones han valorado la aptitud de los ecosistemas presentes en las cartografías para proveer diversos servicios ecosistémicos (Jacobs et al., 2013; Fernández et al., 2020; Córdoba et al., 2022). En ese sentido, hay que tener en cuenta que no sólo es importante valorar esa cuestión, sino cómo se modifica la capacidad de provisión de un servicio cuando ocurre simultáneamente a otro, cuestión que requiere el estudio de las sinergias y “trade-offs” para su adecuado análisis.

La investigación de (Jacobs et al., 2013), propone ya una fórmula para obtener de forma ordenada el “valor” de la interacción entre dos servicios, a saber:

$$C_{j_1 j_2} := \sum_i |A_{j_1}^i - A_{j_2}^i|$$

Donde C_{j_1, j_2} denota la compatibilidad entre los servicios $S_{j_1}^i$ y $S_{j_2}^i$ independientemente del ecosistema E^i , y los $A_{j_1}^i, A_{j_2}^i$ son sus valores de adaptación, tal y como se define en la sección 2.

Ese valor de interacción $S_{ASEa-ASEb}$ se obtiene sumando la diferencia de las aptitudes de dos servicios en todos los ecosistemas. El fundamento de este planteamiento es que una aptitud alta implica que el ecosistema no requiere sufrir muchos cambios para poder proveer ese servicio de forma satisfactoria, por lo que, si un ecosistema tiene una puntuación alta para dos servicios, no requerirá muchos cambios para ninguno de los dos y por tanto podrán coexistir. Naturalmente, este planteamiento debe ser refinado, pues no da suficiente cuenta de qué ocurre, por ejemplo, si la aptitud para dos servicios es alta pero no se incrementa por el hecho de ocurrir simultáneamente, como sí ocurre en otros casos. Por poner un ejemplo cercano, que una zona sea apta para el cultivo de la vid no sólo le confiere un alto valor de abastecimiento, sino que, de llevarse a cabo, el viñedo afecta favorablemente a su valor paisajístico.

Sea como fuere, el hecho de que la valoración sea más o menos ajustada a la realidad no elude la cuestión principal: que esa formulación arroja un dato para cada par de servicios, cuando para el caso de la Comunidad de Madrid hablamos de 25 servicios para cada uno de los 8 ecosistemas. Tampoco da cuenta de qué ocurre cuando se trata de averiguar la “potencialidad” total de cada ecosistema, su aptitud global para proveer servicios ni, por supuesto, permite obtener un mapa, con lo que no puede utilizarse para lo que aquí se plantea: identificar los suelos cuyas aptitudes para proveer servicios ecosistémicos anulan su posible aptitud para el desarrollo urbanístico.

Una investigación anterior (Córdoba et al, 2022), proponía obtener un valor medio de interacción, dando cuenta de la tendencia del ecosistema a permitir más de un uso simultáneo, lo cual significaba de por sí una notable mejora, ya que, al obtener 8 valores (en casos más generales habría que añadir el ecosistema marino), sí se podía territorializar con una cartografía. La formulación que se planteaba era la siguiente:

$$CM^i = \frac{\sum_{j_1 \neq j_2} |A_{j_1}^i - A_{j_2}^i|}{\#\{(A_{j_1}^i, A_{j_2}^i : j_1 \neq j_2)\}}$$

Donde CM^i denota la compatibilidad media en el ecosistema i -ésimo. Se calcula tomando las diferencias entre los valores de adaptación de cada servicio en cada ecosistema, y dividiendo por la cantidad de pares de servicios que se pueden dar en el ecosistema. De nuevo se está usando la notación descrita en la sección 2.

De este modo se puede obtener, por separado, un plano con la aptitud global de cada ecosistema para proveer servicios, y un segundo plano con la aptitud de cada ecosistema de proveer más de un servicio simultáneamente. Sin embargo, no se consigue el objetivo ideal, que es matizar de tal manera la aptitud global de cada ecosistema de manera que sólo dé cuenta de los servicios que realmente pueden ocurrir juntos, y la aptitud real tras tener en cuenta cómo interactúan entre ellos. Es decir, esta investigación propone encontrar un único valor que exprese la aptitud real de cada ecosistema, a partir de la combinación de servicios más ventajosa que éste puede ofrecer. Así podría evaluarse de manera más precisa el valor de cada ecosistema en cuanto a los servicios que presta, a la vez que se podrían obtener compatibilidades e incompatibilidades para el régimen de usos del Suelo No Urbanizable, cosa nada despreciable si se piensa por ejemplo en los problemas que supone el uso actual del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, que pese a gozar de la máxima protección según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), sufre grandes daños anualmente por el uso inapropiado que se hace de su espacio.

Cabe destacar que este método, al tratarse de una formulación matemática, es independiente tanto de la región de estudio como de los valores reales, e incluso independiente del método que se escoja para valorar cada interacción entre un par de servicios. Esto último es muy importante, pues permite un amplio margen de mejora de la evaluación de interacciones, manteniendo intacto el método de obtener el valor global.

2. Método a partir de la Teoría de Grafos

Antes de describir nuestro método, se hace perentorio introducir algo de notación. Cada ecosistema i -ésimo se denotará por E^i , mientras que cada servicio j -ésimo del ecosistema se denotará por E^j . Además, cada servicio tiene una aptitud en el ecosistema, denotado por A_j^i , y dos servicios $S_{j_1}^i$ y $S_{j_2}^i$ del ecosistema tendrán una compatibilidad, C_{j_1, j_2}^i . Para normalizar los valores con los que se trabaja, se asumirá que tanto las aptitudes como las compatibilidades son valores entre 0 y 1, donde 0 es la mínima aptitud-compatibilidad, y 1 la máxima.

Para desarrollar la metodología se modeliza la situación como un problema de grafos. Un grafo G se define como un conjunto $\{v\}$ de vértices que se conectan por un conjunto $\{a\}$ de aristas, esto es, $G = (\{v_i\}_i, \{a_i\}_i)$. En este caso, se construye un grafo G^i para cada ecosistema, donde los vértices serán todos los servicios, y las aristas conectarán dos servicios si éstos son compatibles, es decir, si su compatibilidad es mayor que 0. Además, estas aristas llevarán asociado el valor de la compatibilidad de los dos servicios que conecta.

El último concepto que se maneja es el de *clique* o *subgrafo completo*, el cual designa a un subconjunto del grafo en el que existen aristas conectando cualquier par de vértices. En esta situación, un clique será cualquier conjunto de servicios que sea compatibles entre sí en un ecosistema. De esta forma, el objetivo será el de medir la cantidad y calidad de cliques que existen en un ecosistema. Así, cuanto mayor sea esta medida, más "rico" será el ecosistema, en el sentido de que contará con muchas combinaciones de servicios altamente compatibles, y con altas aptitudes. En la imagen inferior, podemos imaginarnos un clique rojo formado por tres servicios compatibles entre sí, como por ejemplo el de regulación climática, regulación del ciclo hídrico y

regulación de las temperaturas; y el clique verde formado por otros servicios que no son compatibles con estos, pero sí entre sí. Por último, los nodos azules serían aquellas combinaciones de servicio que no son capaces de unir más de dos servicios.

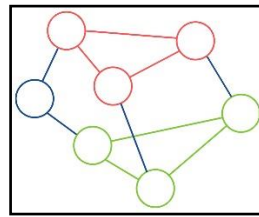


Fig. 01 Representación de un grafo que contiene dos cliques, el formado por los vértices rojos y el formado por los verdes. Fuente: Elaboración propia

Para medir la calidad de un clique Cq del grafo G^i , con n vértices, se realiza el siguiente cálculo:

$$Q(Cq) := \frac{1}{n} \sum_{S_{j_1}^i \in C} \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{S_{j_2}^i \in C \\ S_{j_1}^i \neq S_{j_2}^i}} A_{j_1}^i A_{j_2}^i C_{j_1, j_2}^i$$

Con esta fórmula se calcula una media en todos los servicios $S_{j_1}^i$ del clique, de la media en todos los servicios $S_{j_2}^i$ compatibles con el $S_{j_1}^i$ de los valores $A_{j_1}^i A_{j_2}^i C_{j_1, j_2}^i$. Al ser las aptitudes y las compatibilidades valores entre 0 y 1, estas cantidades también estarán entre 0 y 1, al igual que la media total $Q(Cq)$. Finalmente, para medir la "riqueza" del ecosistema E^i , se calcula la media de $Q(Cq)$ en todos los posibles cliques del grafo G^i :

$$R(E^i) := \frac{\sum_{Cq \subset G^i} Q(Cq)}{\#\{Cq \subset G^i\}}$$

Este valor será una cantidad entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1, mayor cantidad de combinaciones compatibles y valiosas tendrá el ecosistema.

SERVICIOS	PARQUES URBANOS	TIERRAS DE CULTIVO	PASTIZALES	BOSQUES Y BOSQUETES	BREZALES Y ARBUSTOS	TIERRAS CON ESCASA VEGETACIÓN	HUMEDALES	RIOS Y LAGOS
ABASTECIMIENTO								
ALIMENTOS	2	3	3	1	2	0	1	1
AGUA DULCE	0	0	3	3	2	1	3	3
MATERIAS PRIMAS	0	1	1	2	1	0	0	0
DIVERSIDAD GENÉTICA	2	3	3	3	3	2	3	3
MEDICINA NATURAL	2	2	1	1	3	1	0	0
REGULACIÓN								
MANTENIMIENTO DEL HÁBITAT CLIMÁTICA	2	2	3	3	3	3	3	3
REDUCCIÓN DEL RUIDO	2	1	2	3	2	1	2	2
AMORTIGUACIÓN DE LAS ALTAS TEMPERATURAS	3	0	0	3	1	0	0	0
CALIDAD DEL AIRE	3	1	2	3	2	1	3	3
CICLO HIDROLÓGICO	2	0	3	3	3	1	3	3
CONTROL DE LA EROSIÓN	0	0	3	3	3	2	0	0
FERTILIDAD DEL SUELO	0	0	3	3	3	1	0	0
PERTURBACIONES NATURALES (INUNDACIONES)	0	0	3	3	3	0	3	3
CONTROL BIOLÓGICO	3	2	3	3	3	3	3	3
POLINIZACIÓN	2	3	3	1	3	2	0	0
CONSERVACIÓN DE ENDEMISMOS	0	2	3	3	3	3	3	3
PRODUCCIÓN DE SUELO	0	0	2	3	2	1	0	0
CULTURALES								
RECREO	3	0	2	3	2	0	3	3
CONOCIMIENTO CIENTÍFICO	3	3	3	3	3	3	3	3
EDUCACIÓN AMBIENTAL	3	2	3	3	3	3	3	3
CONOCIMIENTO TRADICIONAL	0	3	1	3	2	0	1	2
DISFRUTE DEL PAISAJE	2	3	3	3	2	0	3	3
IDENTIDAD CULTURAL	1	3	3	3	3	1	3	3
INSPIRACIÓN "ESPIRITUAL"	2	1	2	3	2	1	3	3

Tabla 1 Valoraciones preliminares de cada servicio ecosistémico en cada ecosistema. Fuente: (Elaboración propia a partir de los datos en Córdoba y Martí, 2022)

Veamos ahora, con el ejemplo de la Comunidad de Madrid, cómo puede aplicarse este método. Siguiendo los resultados obtenidos por (Córdoba et al., 2022), a partir de una modificación de la metodología de MAES (Maes et al., 2013), existen ocho ecosistemas y veinticinco servicios para la Comunidad de Madrid, agrupados en tres grupos, con sus correspondientes valoraciones iniciales.

Dado que estas aptitudes solo pueden tener un valor de 0, 1, 2 o 3, se dividen todos los valores por 3, para tener valores de A_j^i entre 0 y 1. Por otra parte, se puede obtener, a partir de estos datos, el valor de cada interacción entre cada par de servicios dados calculando $C_{j_1, j_2}^i := 1 - |A_{j_1}^i - A_{j_2}^i|$ (cuando alguna aptitud sea 0, se considera también que dicha compatibilidad es 0). Nótese que no se calcula la media de las diferencias en todos los ecosistemas, como proponía Jacobs (2013), puesto que se considera que la compatibilidad entre dos servicios es dependiente del ecosistema. Como se calculan 625 interacciones (la combinación entre 25 servicios posibles), en la siguiente tabla sólo se muestran las interacciones relativas a la producción de alimentos.

		Ecosistemas principales de la Comunidad de Madrid							
Aportes ecosistémicos		PAR	CUL	PAS	BOS	ByA	TEV	HUM	RyL
Alimentos		C	C	S	C	S	#	C	C
Agua dulce		#	#	S	S	S	M	M	M
Materias primas		#	C	C	M	M	#	#	#
Diversidad genética		M	C	S	S	S	M	M	M
Ppios. act. naturales de uso medicinal		M	M	C	C	S	M	#	#
Grado de interacción	de	M	C	M	M	S	M	C	C

Tabla 2 Valoraciones de interacción para cada par de servicios de abastecimiento, donde: S=sinergia, M=interacción media, C=Contradicción, #=incompatible. Fuente: (Córdoba y Martí, 2021)

Calculando la riqueza de cada ecosistema con los valores descritos, se obtienen los siguientes datos para cada uno de los 8 ecosistemas de la Comunidad de Madrid:

Ecosistema	Valor
<i>Parques urbanos</i>	0,484
<i>Tierras de cultivo</i>	0,401
<i>Pastizales</i>	0,631
<i>Bosques y bosquetes</i>	0,897
<i>Brezales y arbustos</i>	0,561
<i>Tierras con escasa vegetación</i>	0,209
<i>Humedales</i>	0,907
<i>Ríos y lagos</i>	0,907

Tabla 3 Valoraciones finales de cada ecosistema. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, la metodología descrita puede no ser aplicable para cualquier sistema de aptitudes y compatibilidades. En este caso, se puede obtener de forma analítica el valor $R(E^i)$ para cada ecosistema, pero si hubiera que encontrar todos los cliques de un grafo de forma computacional, podría tratarse de un

problema intratable. Por ello, también se describe un breve algoritmo heurístico con el que poder encontrar alguna combinación de servicios con un valor de calidad alto, aunque no tiene por qué ser el óptimo.

El algoritmo, siguiendo el espíritu de los clásicos algoritmos de Kruskal (1956) y Prim (1957), consiste en visitar todos los nodos (servicios) del grafo e ir creando “sacos” de servicios. Cuando se visita un servicio se comprueba si, para cada “saco” ya creado, el servicio es compatible con todos los presentes en él. En caso afirmativo, se añade el servicio al “saco”. Si el servicio no puede ser añadido a ningún “saco”, se crea uno nuevo que solo lo contenga a él. Finalmente, de la lista de “sacos” calculada (donde cada “saco” es un clique), se devuelve el que tiene mayor calidad.

Claramente, este algoritmo depende bastante del orden en que se visitan los nodos, pero si se ordenan previamente en función de sus aptitudes y prioridades, si es que las hay, se puede llegar a soluciones razonables. Para el caso de la Comunidad de Madrid, se ha tomado como prioridad el analizar primero los servicios de regulación. Así, algunas de las combinaciones de servicios que se obtienen son las siguientes:

	PARQUES URBANOS	TIERRAS DE CULTIVO	PASTIZALES	BOSQUES Y BOSQUETES	BREZALES Y ARBUSTOS	TIERRAS CON ESCASA VEGETACIÓN	HUMEDALES	RÍOS Y LAGOS
ABASTECIMIENTO								
ALIMENTOS								
AGUA DULCE								
MATERIAS PRIMAS								
DIVERSIDAD GENÉTICA								
MEDICINA NATURAL								
REGULACIÓN								
MANTENIMIENTO DEL HÁBITAT CLIMÁTICA								
REDUCCIÓN DEL RUIDO								
AMORTIGUACIÓN DE LAS ALTAS TEMPERATURAS								
CALIDAD DEL AIRE								
CICLO HIDROLÓGICO								
CONTROL DE LA EROSIÓN								
FERTILIDAD DEL SUELO								
PERTURBACIONES NATURALES (INUNDACIONES)								
CONTROL BIOLÓGICO								
POLINIZACIÓN								
CONSERVACIÓN DE ENDEMISMOS								
PRODUCCIÓN DE SUELO								
CULTURALES								
RECREO								
CONOCIMIENTO CIENTÍFICO								
EDUCACIÓN AMBIENTAL								
CONOCIMIENTO TRADICIONAL								
DISFRUTE DEL PAISAJE								
IDENTIDAD CULTURAL								
INSPIRACIÓN "ESPIRITUAL"								

Tabla 4 Una de las posibles combinaciones de usos más eficaces, donde las casillas coloreadas representan los usos que pueden usarse en la combinación. Fuente: Elaboración propia

De este modo, la tabla que se muestra más arriba propone una posible combinación de usos para cada ecosistema, de manera que podría usarse como base desde la que organizar el régimen de usos de un Suelo No Urbanizable donde existiera uno de esos ecosistemas. Esta lista da cuenta, como se ha comentado antes, de una de las mejores combinaciones de usos en términos de valoración, primando siempre los servicios de regulación.

3. Conclusiones y futuro de la investigación

Se ha conseguido obtener, para el caso concreto de la Comunidad de Madrid, y tomando como base valoraciones de servicios y sinergias de otros estudios para otras regiones de España y la Unión Europea, una relación de las mejores combinaciones de servicios en función de sus sinergias. Estas combinaciones consiguen una puntuación muy similar a la de la suma del total de servicios compatibles, descartando por tanto aquéllos que no aportan apenas valor según este método. Al conseguir de este modo un valor único y específico, se puede representar sin dificultad alguna en el plano, matizando y, sobre todo, haciendo más

riguroso el argumento de protección de los suelos que presenten un valor final alto. Como se ha mostrado más arriba, de esta manera también se obtiene una propuesta preliminar de Régimen de Uso para esos espacios, que permite aquellos usos para los que ese ecosistema es más apto.

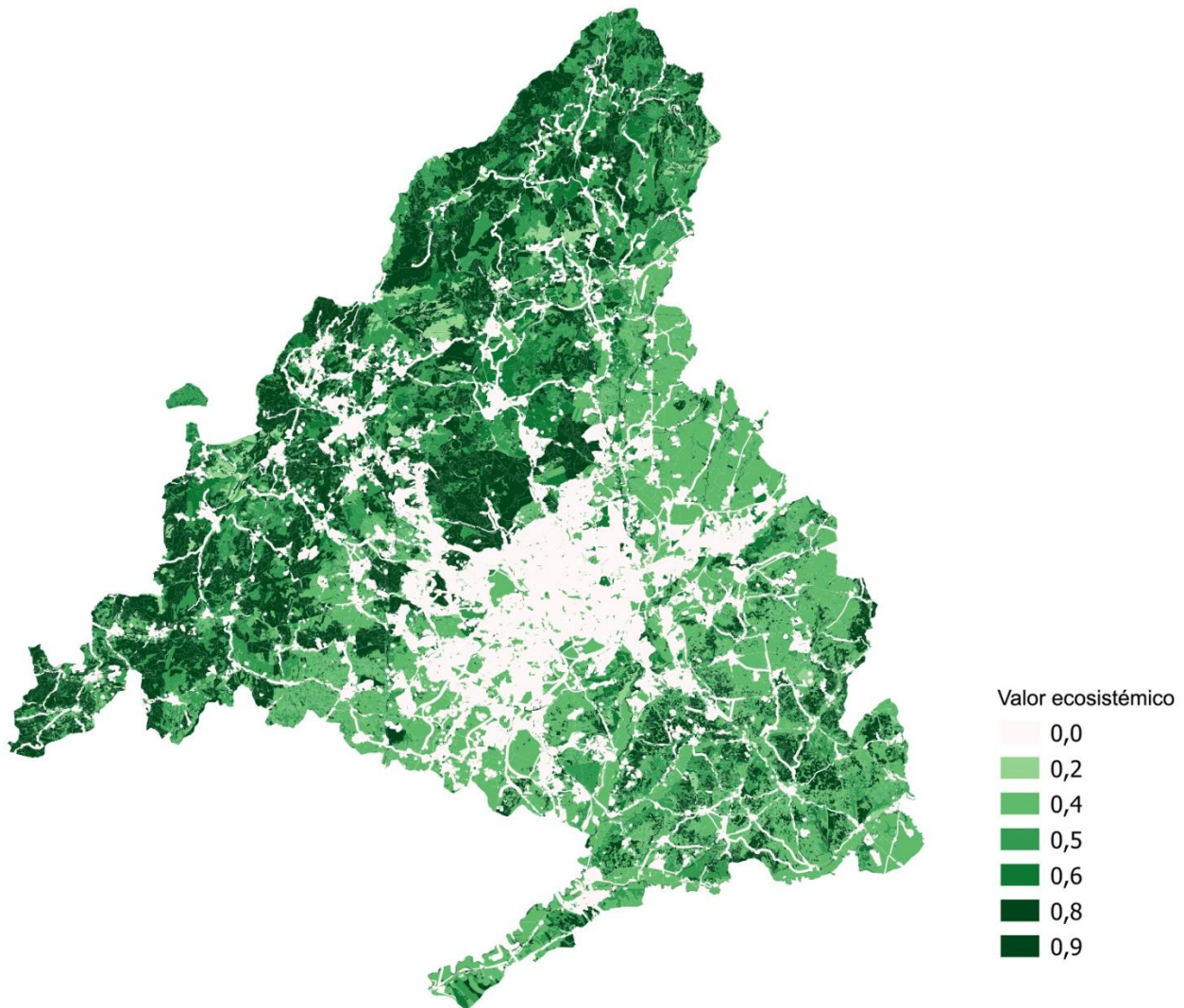


Fig. 02 Mapa de valoración de los servicios ecosistémicos según los datos de la Tabla 3. Fuente: Elaboración propia

Esta investigación requeriría una serie de mejoras futuras. En primer lugar, como se ha comentado anteriormente, es de capital importancia llegar a ser capaces de valorar de manera más sistemática la aptitud de cada ecosistema para cada servicio, con datos cualitativos y cuantitativos cuya obtención sea replicable en distintos ámbitos. Hay valores, como los de regulación, donde no sería complicado ligar la presencia de endemismos o la biodiversidad que aportan a la existencia de grupos paraguas o especies endémicas en cada región. Sin embargo, los valores culturales y espirituales presentan dificultades ciertamente más serias. Por supuesto, cuanto más lógica y rigurosa sea la manera de valorar inicialmente los servicios para cada ecosistema, mejor será el método para proteger los suelos que lo merecen.

Por otro lado, es innegable que el método de obtención del valor de interacción, por comparación de aptitudes, es tan ágil como imperfecto, por lo que habría que avanzar, también, hacia la generación de una manera mejor de dar cuenta de las interacciones. Siempre que la lista de servicios sea constante, habrá una serie de interacciones que serán fáciles de manejar, particularmente las que apliquen en cualquier ecosistema. No obstante, cuando la interacción varíe dependiendo de sí, por ejemplo, las zonas de arbusto son de clima

mediterráneo o atlántico, requerirán un estudio más detallado. Quizá una línea de investigación pueda tratar de dar cuenta de esto según los distintos climas de España, indicando el valor de interacción para cada uno de los climas más representativos de la Península (clima atlántico, mediterráneo, subtropical y de montaña, principalmente). No hay que olvidar, por otro lado, que el potencial de esta metodología reside en parte en su capacidad de ser replicado, por lo que no debería convertirse, creemos, en algo inmanejable.

Por último, como se ha expresado en la fórmula del grafo propuesto, esta investigación presupone que la interacción entre cada par de servicios es un fenómeno simétrico, y afecta por igual a ambos servicios. Lógicamente, esta relación suele ser asimétrica, donde un servicio anula o perjudica al otro, pero no se ve afectado por él, por ejemplo. Podría tratarse de aplicar un factor de corrección de esto, que catalogue cada una de las interacciones dadas (suponiendo que la lista con la que se ha trabajado sea fija) según su tipo de interacción, siguiendo por ejemplo una clasificación biológica (depredación, mutualismo, simbiosis, comensalismo, parasitismo...).

En cualquier caso, la posibilidad abierta por la capacidad de representar de manera fidedigna las interacciones junto a las valoraciones en un mapa, unida a la propuesta de combinación de servicios más favorable, supone un avance de gran importancia en el campo del uso de los servicios ecosistémicos en el planeamiento.

4. Bibliografía

CÓRDOBA HERNÁNDEZ, R. (2021). Estructura territorial resiliente: análisis y formalización a través del planeamiento urbanístico. Tesis (Doctoral), E.T.S. Arquitectura (UPM).

CÓRDOBA HERNÁNDEZ, R. y MARTÍ GUITERA, L. (2022). Ecosystem Vulnerability due to Planning. The role of regulatory ecosystem contributions in the land planning. SUPTM 2022: 1st Conference on Future Challenges in Sustainable Urban Planning & Territorial Management, 17–19 enero 2022.

FERNÁNDEZ DE MANUEL, B., PEÑA LÓPEZ, L., AMETZAGA ARREGI, I., y ONAINDIA OLALDE, M. (2020). Guía práctica para la integración de los servicios de los ecosistemas en la formulación de planes y programas territoriales y urbanísticos.

JACOBS, S., STEVENS, M., REETH, W. VAN DAELE, T. VAN SCHNEIDERS, A., DEMOLDER, H., THOONEN, M., VAN GOSSUM, P., y PEYMEN, J. (2013). Capacity for delivery of ecosystem services - Interim evaluation of a method based on agriculture and expert knowledge in Flanders.

KRUSKAL, J. B. (1956). On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1), 48-50.

PRIM, R. C. (1957). Shortest connection networks and some generalizations. *The Bell System Technical Journal* (Nueva York), 36(6), 1389-1401.

MAES, J., TELLER, A., ERHARD, M., LIQUETE, C., BRAAT, L., BERRY, P., EGOH, B., PUYDARRIEUX, P., FIORINA, C., SANTOS-MARTÍN, F., PARACCHINI, M. L., KEUNE, H., WITTMER, H., HAUCK, J., FIALA, I., VERBURG, P. H., CONDÉ, S., SCHÄGNER, J. P., MIGUEL, J. S., ... BIDOGLIO, G. (2013). Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. An analytical framework for ecosystem assessments under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. (2004). Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. *Choice Reviews Online*, 41(08), 41-4645-41-4645. <https://doi.org/10.5860/choice.41-4645>